

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820100154003

UDC _____

厦门大学

博 士 学 位 论 文

黑洞吸积盘中的非稳态过程研究

Non-Stationary Processes in Black-Hole Accretion Disks

林达斌

指导教师姓名: 卢炬甫 教授

专 业 名 称: 理 论 物 理

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 7 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

在天体物理吸积盘中，粘滞扮演着两种角色，一是转移角动量，一是加热吸积盘中的气体。这两个过程中，粘滞起到了决定性的作用。如此，假如粘滞有一定的涨落，必然导致其所涉及到的相应过程有一定的涨落，从而引起温度、压强、吸积率等参量有一定的变化。在某些情况下，甚至能够触发吸积盘的不稳定行为。

在分析吸积盘稳定性的时候，传统的处理方法是直接使用 α 粘滞，也就是 $\tau_{t\varphi} = -\alpha p$ ，来考虑气体对粘滞的反馈。姑且不论气体对粘滞是否有影响，这种考虑方式就已脱离了实际的物理过程。因为它给出了零延迟的反馈行为，也就是：气体参数的涨落能够立即引起粘滞的涨落。为了修正这种行为，我们在第二章引入了延迟的粘滞形式，并分析延迟对吸积盘稳定性的影响。分析结果显示，延迟能够降低标准薄盘热力学不稳定的增长率，但不会改变不稳定的判据及粘滞不稳定的增长率。我们还给出了长波扰动下，不稳定增长率 ω 对延迟时间 t_{ps} 的依赖关系。这个关系显示：在延迟时间 t_{ps} 比较大的时候，热力学不稳定的增长时标约等于 t_{ps} 。延迟能够改变标准薄盘热力学不稳定的增长率，必然也能够一定程度上影响这种不稳定触发的行为，如：Limit-cycle。另外，我们也对延迟时标做了适当的讨论，得到的结果为： $t_{ps} \gtrsim t_{th}$ ，也就是延迟时标约等于或大于一个热力学时标。

在稳定的吸积流中，粘滞的涨落能够引起气体参量的变化。在第三章，我们根据能量方程(及恒定面密度)研究了标准薄盘中粘滞耗散的涨落所导致的一些现象，如延迟、功率谱的关系、相关性等等。分析显示：[1] 气体内能相对于磁场能量有一定的延迟，长时标涨落下的延迟时间约为一个热力学时标，这成功地解释了数值模拟中发现的延迟现象；[2] 气体内能涨落的幅度小于磁场能量涨落的幅度，这跟数值模拟得到的结果很好地吻合；[3] 气体压强表现出与磁剪切粘滞的相关，分析得到的相关关系跟数值模拟给出的关系一致。

在第四章，我们研究了粘滞涨落所引起的吸积率的涨落的传播行为，主要是依据 Lyubarskii 方案，考虑了外流对吸积盘光变的影响。在假设了 \dot{M} 随半径变化的函

数为 $\dot{M} \propto r^s$ 时, 我们得到的光变功率谱为: $P(f) \propto f^{-\beta}$, 这里, β 参数与具体的吸积流相关: 对于ADAF, $\beta = 1 + 4s / 3$; 对于NDAF, $\beta = 1 + 5s / 2$; 而对于标准薄盘的外区、中区及内区, β 分别为 $1 + 40s / (25 - 6s)$ 、 $1 + 10s / (7 - 2s)$ 和 $1 + 4s / (7 - 4s)$ 。而内区吸积率的涨落, 其功率谱谱指数介于上面给出的表达式和1之间。从这些表达式可以看出, 伽马射线暴中心引擎的光变功率谱谱指数 β 通常高于光子冷却主导的吸积流。同时, β 数值与外流参数 s 的关联暗示, 通过光变功率谱谱指数可以估计吸积盘中外流的强度。我们将这些结果应用到Cyg X-1中, 发现给出的功率谱谱指数跟观测数据相当接近。

关键词: 吸积盘; 粘滞; 不稳定性; 光变

ABSTRACT

The viscous stress plays two fundamental roles in the accretion disks. One is the transport of angular momentum and the other is the viscous heating. If the viscous stress performs some variability, these two processes will exhibit corresponding variability and therefore the fluctuations of gas temperature, pressure, and accretion rate will be induced. In some situations, the instability of disks may be triggered.

The stability analysis of the standard thin accretion disks is always performed with α -prescription, i. e., $\tau_{\varphi} = -\alpha p$. In this situation, the feedback of pressure on the viscous stress is processed with zero-time lag. This kind of description may loss some important information, such as lag behavior, of the realistic situation. For modifying this situation, we introduce a delay form of α -prescription to describe the effect of pressure on the viscous stress with time-scale t_{ps} , and perform the stability analysis of the standard thin disks in Chapter 2. We find that the growth rate of thermally unstable modes can decrease significantly owing to the stress delay. However, the critical behavior of disk instability and the growth rate of viscously unstable modes are the same as the analytical results with α -prescription. For long wavelength perturbations and significantly large t_{ps} , the growth time-scale of thermally unstable modes is around t_{ps} . The different behavior of thermally unstable modes may imply different evolution of disks due to instability, and thus the delay form of α -prescription should reveal itself in the evolution of disks, such as limit-cycle behavior of GRS 1915+105. Based on the results from simulations and the behavior of viscous stress in the disks, it is plausible to believed that the value of t_{ps} should be around or larger than thermal time-scale, i. e., $t_{\text{ps}} \gtrsim t_{\text{th}}$.

For stable disks, the gas may suffer some fluctuations due to the variability of viscous stress. In Chapter 3, we study the fluctuations of standard thin disks by linear analysis of the time-dependent energy equation together with a constant surface density. We show that some of the simulation results in Hirose et al. (2009), such as the time delay, the relationship of power spectra, and the correlation between magnetic energy and radiation energy, can be well understood by our analytic results.

In Chapter 4, following Lyubarskii's general scheme, we revisit the power spectral density of luminosity fluctuations by taking into account the role of outflows. We find that, for inflow mass accretion rate $\dot{M} \propto r^s$, the power spectrum of the flicker-noise component will present a power-law distribution $P(f) \propto f^{-\beta}$, where the value of β depends on the solution of disks: $\beta = 1 + 4s/3$ for advection-dominated disks, and $\beta = 1 + 40s/(25 - 6s)$ for the outer region of standard thin disks, $\beta = 1 + 10s/(7 - 2s)$ for the middle region, $\beta = 1 + 4s/(7 - 4s)$ for the inner region, and $\beta = 1 + 5s/2$ for neutrino-dominated accretion flows. The power spectrum index for the accretion rate fluctuations in the inner region is located between unity and the value presented in the above expressions. The above expressions imply that β in the gamma-ray bursts (GRBs) is generally larger than that in the Galactic black hole binaries for comparable s , and indicate the possibility of evaluating the strength of outflows by the power spectrum of variability. The application of our results to Cyg X-1 presents a similar result to the observational one.

Key words: accretion disks; instabilities; variability; viscous stress.

目 录

第一章 吸积盘简介	1
第一节 吸积相关物理量	2
第二节 吸积盘基本图像：标准薄盘简介	4
2.1 吸积流演化方程	5
2.2 简单的演化方程	8
2.3 吸积流演化的图像及相关时标	10
2.4 标准薄盘的解	13
2.5 标准薄盘的一些属性	16
第三节 吸积盘相关观测现象	19
3.1 初期恒星体	20
3.2 活动星系核	22
3.3 X 射线双星	25
第四节 其它吸积盘模型：Slim 盘、ADAF	29
4.1 细盘(Slim Disk)	29
4.2 径移主导吸积流(ADAF)	32
参考文献	35
第二章 吸积盘中的粘滞：延迟的粘滞形式	39
第一节 吸积盘粘滞的简介	39
1.1 流体中粘滞的作用	39
1.2 分子粘滞、湍动粘滞	41
1.3 吸积盘中粘滞的起源	44
第二节 延迟的 α 粘滞及其对标准薄盘稳定性的影响	45
2.1 模型	45
2.2 稳定性分析所需方程	46
2.3 吸积盘稳定性分析	47

2.4	总结及讨论	52
	参考文献	54
第三章	数值模拟相关现象分析	57
第一节	数值模拟简介及相关研究进展	57
1.1	局地剪切盒模拟 (Shearing Box Simulation)	57
1.2	全局数值模拟	66
第二节	粘滞涨落所引起的关系：延迟、功率谱关系	67
2.1	涨落量的相互关系	68
2.2	分析结果和数值模拟结果的比较	71
2.3	总结	76
附录：	P_{vis} 和 P_B 的关系	77
	参考文献	80
第四章	外流对吸积盘光变的影响	83
第一节	光变的研究方法及相关观测结果	84
1.1	功率谱、rms	84
1.2	连续功率谱	85
1.3	准周期振荡 (QPO)	87
第二节	1/f 连续功率谱的模型及其观测限制	88
2.1	唯象模型：散弹噪声模型	88
2.2	Lyubarskii 方案	90
2.3	观测限制： σ 和流量的关系	91
第三节	外流对 1/f 光变的影响	92
3.1	吸积率涨落的演化方程：	92
3.2	光变分析	95
3.3	简单的分析及外流的影响	98
3.4	光变功率谱	99
3.5	总结	100
附录 I：	关于 Q 的讨论	102

附录 II: ADAF 中涨落的讨论	102
参考文献	105
第五章 研究展望	107
参考文献:	108
发表文章	109
致 谢	111

CONTENT

Chapter 1. An Introduction To Accretion Disks	1
§ 1. Some Parameters Related To Accretion.....	2
§ 2. Basic Picture — Standard Thin Accretion Disks.....	4
2.1 Evolution Equations.....	5
2.2 Simplified Equations.....	8
2.3 Picture of Disk Evolution and Related Time-scales.....	10
2.4 Solution of Standard Disks.....	13
2.5 Properties of Standard Disks.....	16
§ 3. Accretion Phenomena.....	19
3.1 Young Stellar Objects.....	20
3.2 Active Galactic Nuclei.....	22
3.3 X-Ray Binaries.....	25
§ 4. Other Disks: Slim Disks, ADAF.....	29
4.1 Slim Disks.....	29
4.2 ADAF.....	32
References.....	35
Chapter 2. Evolution Form Of Viscous Stress	39
§ 1. Introduction.....	39
1.1 Viscosity in the Fluid.....	39
1.2 Molecular Viscosity, Turbulent Viscosity.....	41
1.3 Origin of Turbulence.....	44
§ 2. Evolution form of Viscous Stress and Its Effects on the Stability of Standard Disks.....	45
2.1 Model.....	45
2.2 Equations for Stability Analysis.....	46
2.3 Stability Analysis.....	47

2.4	Conclusions and Discussions.....	52
	References.....	54
Chapter 3. Understanding Simulations Of Thin Accretion Disks By Energy Equation		57
§ 1.	Introduction.....	57
1.1	Local Shearing Box Simulations.....	57
1.2	Global Simulations.....	66
§ 2.	Relationship Induced by Viscous Stress Fluctuations.....	67
2.1	Relationship of Fluctuations.....	68
2.2	Comparison Of Analysis and Simulation.....	71
2.3	Conclusions.....	76
	Appendix: The relationship between P_{vis} and P_B	77
	References.....	80
Chapter 4. The influence of outflows on 1/f -like luminosity fluctuations		83
§ 1.	Introduction.....	84
1.1	Power Spectra, rms.....	84
1.2	Continuous Power Spectra.....	85
1.3	Quasi-Periodic Oscillations.....	87
§ 2.	Models for 1/f Variability and Constraints From Observations..	88
2.1	Phenomenological Model: Shot noise model.....	88
2.2	Lyubarskii's General Scheme.....	90
2.3	Constraints From Observations: The relationship between σ and Flux	91
§ 3.	Effects of outflow on 1/f Variability.....	92
3.1	Evolution Equation of fluctuations.....	92
3.2	Variability Analysis.....	95

3.3 Simple Analysis And Effects Of The Coupling Between Outflow And Inflow	98
3.4 Power Spectra	99
3.5 Conclusions	100
Appendix I: The Validity of Constant Q	102
Appendix II: ADAF Situation	102
References	105
Chapter 5. Research Prospects	107
References	108
Publication List	109
Acknowledgements	111

第一章 吸积盘简介

一般而言,天体周围的物质(诸如气体、尘埃、等离子体等)在天体引力作用下落向天体的过程就叫“吸积”(accretion),而相应的物质流就是“吸积流”。例如:当一颗主序恒星(MS: Main-sequence star)与星际云相遇时,星际云中的物质会在恒星引力的作用下落向恒星,这个过程就是吸积。在观测上,比较典型的天体除了上面提到的主序恒星以外,还有原恒星(protostar)、白矮星(WD: White Dwarf)、中子星(NS: Neutron Star)及黑洞(BH: Black Hole)。进行物质吸积的天体在本文以后的讨论中都称为“中心天体”。

在吸积过程中,如果吸积物质相对于中心天体没有旋转角动量,则产生的吸积就是球对称吸积,也称为Bondi吸积^[1];假如吸积物质相对于中心天体有一定的旋转角动量,则可能形成吸积盘。这里,“吸积盘”(accretion disk)是一种由弥散物质组成的、围绕某个中心天体转动且存在吸积现象的盘状结构。在吸积盘中,不同半径处的物质围绕中心天体的旋转角速度可能会不同,这种现象称为“较差转动”(differential rotation)。这种情况下,若气体又存在一定的粘滞,那么,盘中物质的角动量就会通过粘滞向外传递,与此同时,失去角动量的物质落向中心天体,也就是形成了吸积流。不管是Bondi吸积过程,还是吸积盘通过粘滞所发生的吸积过程,物质所携带的引力势能均得到释放。这些能量有部分用于加热气体,激发气体产生高光度辐射,于是便形成了我们所观测到的天体活动现象。在本论文中,我们仅仅讨论吸积盘中的活动现象,不涉及Bondi吸积过程。

人们对于吸积盘的研究从很早就开始了。在20世纪20年代左右,吸积盘理论就被运用于解释原始太阳星云的形成及演化,是太阳系早期演化的一种比较成功的理论。因为康德、拉普拉斯星云学说在解释太阳系结构方面遇到一些问题,这个时期的吸积盘研究主要侧重于解释太阳系的行星及卫星的分布,也就是主要集中在吸积盘的位形上^[2]。二战结束后,天文学有了很大的发展,很多新的天体现象被发现,这其中就包含了类星体。在类星体的研究中,有一个基本问题是确定它们的能源机制。1969年,Lynden-Bell^[3]首次用吸积盘理论解释了类星体的能源机制。通过这个

开创性的工作，不仅有大量的天文观测现象获得了很好的解释，而且促使吸积盘的研究方向从位形研究向能量机制的转变^[4]。至此之后，人们对吸积盘的研究逐渐深入，不仅提出了各种模型，而且在X射线双星，激变双星等领域的研究也有了很大的发展。

在这一章，我们简短地介绍一下吸积盘的结构。第一节主要介绍在吸积盘研究中经常涉及到一些物理量；第二节通过一定的方法给出标准薄盘的解，并分析吸积流的一些基本属性；第三节主要讨论与吸积盘相关的一些观测现象；第四节讨论吸积盘的其它自洽解。

第一节 吸积相关物理量

在这一节，我们介绍在吸积盘研究中经常使用的一些物理概念，如：爱丁顿光度、爱丁顿吸积率，吸积效率。

爱丁顿光度

在吸积盘中，粘滞的作用会导致物质落向中心天体并产生辐射。当吸积流比较小时，吸积过程所产生的辐射场比较弱，其对物质的作用相对于中心天体的引力可以忽略；然而，当吸积流达到一定程度时，其所产生的辐射压会阻止物质进一步下落，此时，一个粒子受到的辐射压与其所受到的来自中心天体的引力相当，辐射压对物质的作用不能被忽略。我们所说的爱丁顿光度(Eddington Luminosity)，就是粒子受到的辐射压与其所受到的来自中心天体的引力相当时的光度。爱丁顿光度也称爱丁顿极限，由Arthur Stanley Eddington(1882–1944)首先提出。根据上面的描述，可以得到爱丁顿光度的表达式^[5]：

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \cong 1.3 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (1-1)$$

其中, m_p 是质子的质量, σ_T 是电子的汤姆孙散射截面, M 为中心天体的质量, G 和 c 分别为引力常数和光速, 而 M_\odot 表示太阳的质量。从这个表达式可以看出, 中心天体所对应的爱丁顿光度与其自身质量成正比。对于太阳质量大小的恒星, 其爱丁顿光度是太阳光度 ($3.8 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$) 的 10^4 倍, 也就是说, 普通恒星的光度远远低于其对应的爱丁顿光度。但对于某些X射线双星及活动星系核, 观测发现, 它们的光度能够接近或达到爱丁顿光度; 而对于伽玛射线暴、超新星爆发, 其爆发状态时, 吸积流处于超爱丁顿光度的环境下。

根据爱丁顿光度, 我们可以定义**爱丁顿吸积率**, 为:

$$\dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{L_{\text{Edd}}}{\eta c^2} \cong 1.4 \times 10^{18} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (1-2)$$

这里, η 为吸积盘的能量转换效率, 详见下面关于吸积效率的讨论, 这里取为0.1。上面的式子意味着, 当吸积盘的吸积率为爱丁顿吸积率时, 其所产生的光度约为中心天体所对应的爱丁顿光度。

吸积效率

在类星体的研究中, 其中的一个基本问题就是确定其能源机制。观测给出, 类星体的典型光度约为 $10^{46} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 寿命约为 10^8 年^[3], 由此可以估计类星体一生所释放的总能量, 数值约为 10^{61} erg , 或者 $\sim 10^7 M_\odot c^2$, 这里, c 为光速。知道了类星体所释放的总能量, 接下来就是确定这些能量是通过什么机制释放出来, 是核反应还是引力能耗散或是其它方式? 为此, 我们首先定义产能效率:

$$\eta = \frac{E}{Mc^2}, \quad (1-3)$$

其中, E 为所产生的总能量, M 为参与作用的物质的总质量。在人类生活中所遇到的产能效率最高的过程是恒星内的核反应, 其数值为 $\eta \sim 0.7\%$ 。假如类星体所释放的能量由核反应提供, 那么, 其对应的类星体的质量应该为 $\sim 10^9 M_\odot$ 。另外, 通过光变时标 t_{var} , 我们可以估计出类星体主要辐射区的尺度 l , 也就是: $l \lesssim ct_{\text{var}}$ 。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库